

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет водного господарства та  
природокористування  
Кафедра автоматизації, електротехнічних та  
комп'ютерно-інтегрованих технологій

**04-03-287**

### **МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до виконання курсової роботи з навчальної дисципліни  
**«Метрологія, технологічні вимірювання та прилади»**  
для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня  
за освітньо-професійною програмою «Автоматизація та  
комп'ютерно-інтегровані технології» за спеціальністю  
151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»  
денної та заочної форм навчання

Рекомендовано науково-  
методичною радою з якості  
ННІАКОТ  
Протокол № 8 від  
29 квітня 2020 р.

Рівне – 2020

Методичні вказівки до виконання курсової роботи з навчальної дисципліни «Метрологія, технологічні вимірювання та прилади» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійною програмою «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» денної та заочної форм навчання [Електронне видання] / Матус С. К., Реут Д. Т. – Рівне : НУВГП, 2020. – 35 с.

**Укладачі:** Матус С. К., доцент кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій;  
Реут Д. Т., старший викладач кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

**Відповідальний за випуск:** Древецький В. В., д.т.н., професор, завідувач кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

**Керівник групи забезпечення спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»:** Древецький В. В., д.т.н., професор, завідувач кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій

© С. К. Матус, Д. Т. Реут, 2020  
© НУВГП, 2020

Метою виконання курсової роботи з дисципліни “Метрологія, технологічні вимірювання та прилади” є закріплення й систематизація набутих теоретичних знань студентами та застосування їх при вирішенні питань виробничого характеру, набуття навичок самостійної роботи, а також застосування знань про основні принципи та методи вимірювання фізичних величин і технологічних параметрів для обґрунтування вибору засобів вимірювання та оцінювання їх метрологічних характеристик.

### **Загальні методичні положення**

Науковою основою систем автоматичного контролю є метрологія і фізичні принципи вимірювання параметрів технологічних процесів, а технічною базою цих систем є засоби вимірювальної техніки і перетворення відповідних параметрів. Засоби перетворення включають в себе надзвичайно широкий спектр перетворювачів.

В курсовій роботі розглядаються термоелектричні перетворювачі, це найбільш поширені перетворювачі для вимірювання температури в промисловості і в наукових дослідженнях. Для кращого набуття практичних навичок методика розрахунків супроводжується описом установок для градування і калібрування термоелектричних перетворювачів. При цьому для всіх варіантів вихідні дані реальні або наближені до реальних, ніби отриманих на підставі експериментів. Така методологія виконання роботи дозволяє умовно поєднати експерименти, аналіз і розрахунки похибок вимірювань.

Кожен студент виконує курсову роботу за індивідуальним варіантом, який відповідає двом останнім цифрам номера залікової книжки (остання цифра відповідає одиницям, а передостання – десяткам в таблицях вибору вихідних даних). Пояснювальну записку виконувати на стандартних аркушах паперу формату А4. При комп'ютерному наборі використовувати Word (кегель 14, інтервал 1,0). Зміст, вступ, розділи, висновки, список літератури починати з нової сторінки. Сторінки нумерувати, починаючи з титульного аркуша, причому на титульному листі номер сторінки не проставляти. Номери сторінок проставляти у нижньому правому куті. Формули у тексті розташовувати у вигляді окремих рядків і нумерувати, під формулами наводити перелік позначень з розшифровкою їхнього значення. Графіки, таблиці, алгоритми і програми повинні бути пронумеровані і мати відповідні назви. Не допускаються скорочення слів за винятком загальноприйнятих. Позначення основних фізичних величин виконують згідно з вимогами SI. Позначення специфічних величин і параметрів виконують згідно з даними довідників та навчальних посібників.

### **Завдання на курсову роботу включає наступні розділи:**

1. Побудувати статичну характеристику терморпарі та обчислити похибки відліку показів по шкалі приладу

2. Провести градування терморпарі

3. Провести калібрування терморпарі

4. Провести моделювання перехідного процесу терморпарі

5. Дослідити вплив параметрів на вихідний сигнал

5.1. Обчислити похибку відліку значення показу

5.2. Визначити величину похибки, зумовлену впливом теплопровідності, дослідивши складний динамічний характер теплової взаємодії елементів

5.3. Розрахувати систематичну похибку вимірювання від теплового випромінювання

5.4. Провести аналіз розміщення (монтаж) терморпарі та впливу систематичної похибки на результат вимірювання температури терморпарі залежно від положення їх в трубопроводі

5.5. Визначити величину похибки, зумовлену впливом швидкості потоку

5.6. Визначити величину похибки, зумовлену впливом електричної ізоляції електродів на точність вимірювання

5.7. Визначити поправку на холодний спай за допомогою експериментальної градувальної характеристики робочої терморпарі

5.8. Розрахувати похибку вимірювання від впливу опору зовнішнього кола

5.9. Визначити величину похибки, зумовлену впливом опору мілівольтметра

6. Провести обробку результатів вимірювання шляхом виключення систематичних складових похибки із результатів вимірювань. Застосувати графоаналітичний спосіб перевірки відповідності розподілу нормальному. Обчислити найбільш ймовірне значення результату вимірювань. Обчислити середньоквадратичного відхилення результату спостережень та результату вимірювань. Оцінити аномальності окремих результатів спостережень. Визначити коефіцієнт варіації. Обчислити гарантійну границю випадкової складової похибки результату вимірювань та записати результат вимірювання

## Характеристика роботи за розділами

### 1. Побудова статичної характеристики

Для градування і калібрування робочої термопари будують ідеальну статичну градувальну характеристику. Статична характеристика термопари при температурі  $\Theta_0 = 0^\circ\text{C} = \text{const}$  у першому наближенні визначається рівнянням

$$E = k \Theta, \quad (1.1)$$

де  $E$  – термоелектрорушійна сила (т.е.р.с.), мВ;  $k$  – чутливість перетворювача, мВ/ $^\circ\text{C}$ ;  $\Theta$  – температура гарячого спаю  $^\circ\text{C}$ ;  $\Theta_0$  – температура холодного спаю,  $^\circ\text{C}$ . При  $\Theta = 0^\circ\text{C}$   $E = 0$ .

На рис.1.1 наведений вид градувальної характеристики, побудований згідно рівняння (1.1).

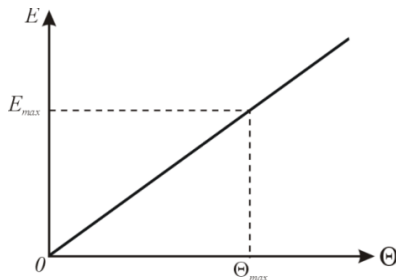


Рис.1.1. Статична характеристика термопари

Згідно свого варіанту вибирають із табл. 1.1 робочу термопару, для неї виписують т.е.р.с.  $E_{100}$  при температурі  $100^\circ\text{C}$ . Визначають чутливість перетворювача

$$k = \frac{E_{100}}{100} \quad (1.2)$$

і будують графік  $E = k \cdot \Theta$  для температур  $\Theta = 0, \dots, \Theta_{\max}$ , де  $\Theta_{\max}$  – максимальна робоча температура, взята із табл.1.1.

Таблиця 1.1

Остання цифра шифру	Тип термоперетворювача	Технологічний діапазон вимірювальних температур $\Theta = 0, \dots, \Theta_{\max}, ^\circ\text{C}$	Т.е.р.с. $E_{100}, \text{мВ}$	$\Delta E, \text{мВ}$
0	ТХА	0 – 400	4,10	+ 0,18
1	ТХК	0 – 100	6,90	+ 0,04
2	ТПП	0 – 500	0,640	+ 0,015

3	ТХА	0 – 360	4,10	+ 0,14
4	ТХК	0 – 150	6,860	+ 0,08
5	ТПП	0 – 480	0,647	+ 0,01
6	ТХА	0 – 320	4,095	+ 0,10
7	ТХК	0 – 200	6,95	+ 0,12
8	ТПП	0 – 470	0,643	+ 0,005
9	ТХА	0 – 280	4,095	+ 0,06

В табл.1.1 позначено:

ТХА – термоперетворювач хромель-алюмелевий;

ТХК – термоперетворювач хромель-копелевий;

ТПП – термоперетворювач платинородій-платиновий;

$\Delta E$  – відхилення т.е.р.с. еталонної термопари від т.е.р.с. робочої при максимальній температурі  $\Theta_{\max}$ .

### 1.1 Обчислення похибки відліку показів по шкалі приладу

Око спостерігача при відліку температури по шкалі вторинного приладу (рис.1.2) повинно розміщуватися так, щоб промінь зору був перпендикулярний до площини цієї шкали. В дійсності спостерігач допускається похибок при відліку значення показу.

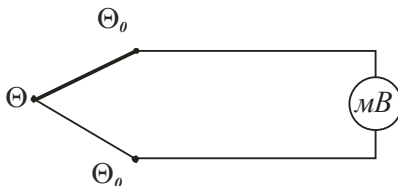


Рис.1.2 Вимірювальне коло термоелектричного термометра

Загальний вираз для обчислення похибки відліку показів

$$\Delta = \Delta_3 + \Delta_{\Pi} + \Delta_i, \quad (1.3)$$

де  $\Delta_3$  – похибка із-за обмеженої розрізняючої здатності зору,  $\Delta_{\Pi}$  – похибка від паралаксу (зміни видимого положення предмета при спостереженні його з двох різних точок  $A_1$  і  $A_2$ ),  $\Delta_i$  – похибка інтерполяції (наближене обчислення значень за деякими даними її значень). При цьому:

$$\Delta_3 = k_3 C \quad (1.4)$$

$$\Delta_{\Pi} = k_{\Pi} C \quad (1.5)$$

$$\Delta_i = k_i C \quad (1.6)$$

де  $k_3, k_{\Pi}, i$   $k_i$  знаходять для свого варіанту згідно табл. 1.2.

Визначаємо ціну поділки мілівольтметра

$$C = \frac{\Theta_{max}}{0,5} \cdot \frac{Kл}{100} \quad (1.7)$$

де  $\Theta_{max}$  приймають для свого варіанту згідно табл.1.1;  $Kл$  – клас точності мілівольтметра вибирають із табл. 1.2.

Після обчислення абсолютної похибки відліку показів  $\Delta$ , приступають до обчислення приведеної похибки відліку показів

$$\gamma = \frac{\Delta}{\Theta_{max}} \cdot 100, \% . \quad (1.8)$$

Таблиця 1.2

Остання цифра шифру	$k_3$	$k_{II}$	$k_i$	$Kл$
0	0,040	0,030	0,110	0,5
1	0,041	0,031	0,109	1,0
2	0,042	0,032	0,108	1,5
3	0,043	0,033	0,107	2,5
4	0,044	0,034	0,106	0,5
5	0,045	0,035	0,105	1,0
6	0,046	0,036	0,104	1,5
7	0,047	0,037	0,103	2,5
8	0,048	0,038	0,102	0,5
9	0,049	0,039	0,101	1,0

## 2. Градування термопар

Для градування вибраної термопары використовують еталонний потенціометр постійного струму класу точності 0,05 і еталонний ртутний термометр згідно табл.2.1. Основні технічні характеристики ртутних термометрів для точних вимірювань наведені в табл.2.1.

Таблиця 2.1

Тип термометра	Діапазон вимірювань °C	Ціна поділки шкали °C	Похибка вимірювання $\pm$ °C	Кількість термометрів
Тр – I	0 – 60	0,01	0,01	2
Тр – II	55 – 155	0,02	0,02	1
Тр – III	140 – 300	0,05	0,05	1
Тр – IV	300 – 500	0,1	0,1	1

Для градування термопари використовують схему установки, наведену на рис.2.1.

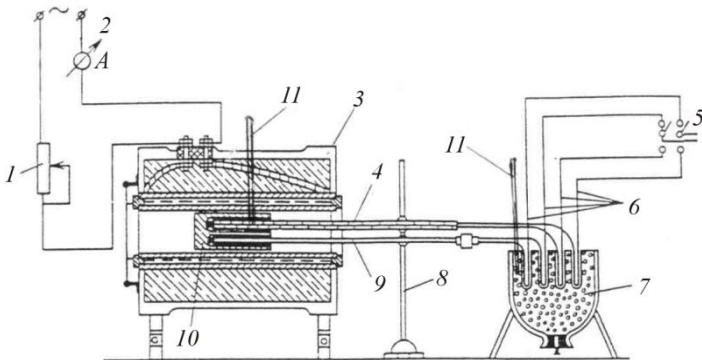


Рис.2.1. Схема установки для градування термоелектричних перетворювачів: 1 – реостат; 2 – амперметр; 3 – піч; 4 – робочий термоелектричний перетворювач (ТЕП); 5 – перемикач; 6 – термоелектродні провідники; 7 – посудина з льодом, який тане; 8 – штатив; 9 – еталонний ТЕП; 10 – металевий блок для вимірювання температури; 11 – еталонний ртутний термометр.

Установка складається з електричної печі 3, зробленої з шамотної або фарфорової трубки довжиною 500 – 700 мм і внутрішнім діаметром 30 – 50 мм. Трубка розміщується в залізному кожусі, а простір між трубкою і кожухом заповнюється тепловою ізоляцією.

На трубку накладена обмотка з ніхрому (7 x 0,2) із щілиною між витками в середній її частині в 3 – 4 мм, по краях – в 2 – 3 мм. Між обмоткою і фарфоровою трубкою для ремонту печі є повітряний простір шириною 4 – 6 мм.

Зовні до корпусу печі наглухо прикріплений штатив 8 з кремальєрою, за допомогою якої запобіжний ковпачок термопари може бути виставлений по вісі печі. В зоні робочого температурного поля на ділянці 70 – 80 мм температура вздовж печі не повинна змінюватися більше, ніж на  $\pm 0,5...0,8$  град. В обмотку печі включають амперметр 2 і реостат 1, що служить для регулювання нагрівання печі. Термопара градується по еталонному термометру, покази якого приймають за дійсні значення температури печі. Градування виконують при температурах

$$\Theta'_i = \frac{\Theta_{max}}{5} \cdot i, \quad (2.1)$$

де  $i = 1, 2, 3, 4, 5$ .

Ці температури виставляють по черзі на шкалі реостату. На протязі всього процесу вимірювання еталонний термометр в посудині Дьюара



повинен показувати  $0^{\circ}C$  (температуру танення льоду). Момент зняття показів визначають візуально по еталонному ртутному термометру. Покази знімають після припинення змін показів термометра з витримкою на час 5 хв. Для подальшого виконання курсової роботи експериментальні дані п'яти вимірювань умовно замінюють розрахунковими даними які визначають за формулою

$$\Theta_i = \Theta'_i + \Delta\Theta_i, \quad (2.2)$$

де  $\Theta'_i$  – попереднє значення температури;  $\Delta\Theta_i$  – поправка до температури, яку беруть з табл.2.2 для свого варіанту. В подальшому температури  $\Theta_i$  будемо вважати дійсними значеннями температури в печі, як би визначеними за показами еталонного ртутного термометра. З побудованого графіка  $E = k\Theta$  (рис.1.1) визначають т.е.р.с. для температур  $\Theta_i$ . Після цього заповнюють табл.2.3.

Таблиця 2.2

Остання цифра суми двох останніх цифр шифру	Поправки до температур, $^{\circ}C$				
	$\Delta\Theta_1$	$\Delta\Theta_2$	$\Delta\Theta_3$	$\Delta\Theta_4$	$\Delta\Theta_5$
0	2	4	6	8	10
1	3	5	7	9	11
2	4	6	8	10	12
3	5	7	9	11	13
4	6	8	10	12	14
5	-6	-8	-10	-12	-14
6	-5	-7	-9	-11	-13
7	-4	-6	-8	-10	-12
8	-3	-5	-7	-9	-11
9	-2	-4	-6	-8	-10

Таблиця 2.3.

№ п/п	Дійсні значення температури $\Theta_i, ^{\circ}C$ .	Т.е.р.с. робочої тармопарі $E_i, мВ$
1.	$\Theta_1$	$E_1$
2.		
3.		
4.		
5.		

Отримані т.е.р.с. вважають такими, що зняті експериментально за показами еталонного потенціометра постійного струму класу 0,05. За даними табл. 2.4 будують графік  $E = f(\Theta)$ .

Потім виконують перевірку градувальної характеристики робочої термопары. Для цього, використовуючи побудований градувальний графік робочої термопары  $E = f(\Theta)$ , знаходять т.е.р.с., які розвиває термопара при температурах

$$\Theta_{i_e} = \Theta_i - 25, \quad (2.3)$$

де  $i = 1, 2, 3, 4, 5$ .

Результати записують в табл.2.4 і визначають похибки градування термопары, приймаючи за дійсні значення т.е.р.с. термопары, знайдені з ідеального статичного градувального графіка згідно формули (1.1).

Таблиця 2.4.

№ п/п	Температура °C	Т.е.р.с. робочої термопары $E, мВ$	Дійсні значення т.е.р.с. $E_{\partial}, мВ$	Похибки		
				Абсолютна, мВ	Відносна, %	Приведена, %
1.	$\Theta_1$	$E_1$	$E_{\partial 1}$	$\Delta E_1$	$\delta_1$	$\gamma_1$
2.						
3.						
4.						
5.						

Похибки шукають за такими формулами

- абсолютна

$$\Delta E = E - E_{\partial}; \quad (2.4)$$

- відносна

$$\delta = \frac{\Delta E}{E_{\partial}} \cdot 100\%; \quad (2.5)$$

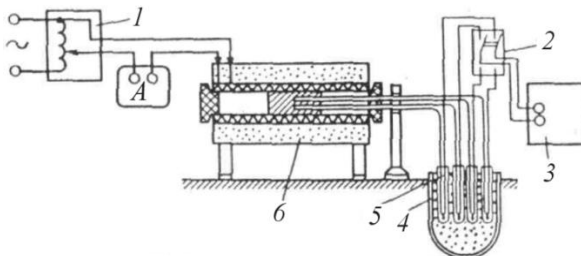
- приведена

$$\gamma = \frac{\Delta E}{E_{\partial.гp}} \cdot 100 \%, \quad (2.6)$$

де  $E_{\partial.гp}$  – граничне значення т.е.р.с. градувальної характеристики.

### 3. Калібрування термопар

Для калібрування термопар складають схему згідно рис.3.1. Калібрування термопар проводять методом звіряння в інтервалі температур 10...300°C у водяному чи масляному термостатах, а в інтервалі температур 200...1700°C – в електричних горизонтальних трубчастих печах. Нагрівна обмотка із ніхрому забезпечує температуру в печі до 1000°C.



*Рис.3.1. Установка для калібрування термопар:  
1 – автотрансформатор; 2 – перемикач; 3 – потенціометр; 4 –  
посудина з чистим танучим льодом; 5 – пробірки; 6 – піч; 7 – робоча  
термопара; 8 – еталонна термопара; 9 – мідні провідники.*

При калібруванні термопар методом звіряння забезпечують рівність температур робочих кінців робочої і еталонної термопар.

При калібруванні виконують умови:

- а) робочі кінці термопар повинні знаходитися в хорошому тепловому контакті між собою;
- б) робочі кінці термопар повинні знаходитися приблизно на місці розташування максимуму температури печі;
- в) пучок термопар повинен бути центрований по вісі печі;
- г) після встановлення термопар в піч отвори останньої повинні щільно закриватися перепаленим азбестом.

При калібруванні термопар із неблагородних металів для забезпечення доброго теплового контакту робочих кінців застосовують металічний блок з декількома висвердленими в ньому отворами.

До температур 500°C використовують блок із червоної міді, а вище – із нікелю. Блок розміщують в зоні рівномірного температурного поля.

Під час калібрування методом звіряння вільні кінці термопар повинні підтримуватися при постійній температурі, рівній 0°C. Для цієї мети до кінців термоелектродів термопар підключають мідні з'єднувальні провідники при допомозі пайки чи скрутки. Місце з'єднань розміщують в скляних пробірках і опускають на глибину 80...100 мм в однорідну суміш подрібненого льоду і води. Для кращого теплообміну в склянку пробірки заливається трансформаторне масло чи легкоплавкий сплав.

При досягненні в печі необхідної температури величину струму в колі нагрівника регулюють автотрансформатором так, щоб швидкість зміни температури в печі не перевищувала 0,2...0,4°C за 1 хв. Після цього вимірюють по черзі т.е.р.с. еталонної та робочої термопари, підключаючи їх за допомогою перемикача до потенціометра постійного струму. Роблять чотири вимірювання в приблизних точках

$$E_i \approx \frac{E_{max}}{4} \cdot i \quad (3.1)$$

де  $i = 1, 2, 3, 4$ , а  $E_{max}$  відповідає температурі  $\Theta_{max}$  (табл.1.1). Відповідно для кожного  $E_i$  за градувальною характеристикою, побудованою в п.2, визначають для робочої термопари температуру  $\Theta_i$ .

Т.е.р.с. еталонної термопари, вимірної потенціометром, умовно приймають рівною

$$E_{ie} = E_i^* + \frac{\Delta E}{4} \cdot i \quad (3.2)$$

де  $E_i^* = \frac{E_{max}^*}{4} i$  для еталонної термопари,  $E_{max}^*$  відповідають температурі

$\Theta_{max}$ ,  $\Delta E$  виписують із табл.1.1, а  $i = 1, 2, 3, 4$ .

Для знаходження дійсної температури  $\Theta_{ie}$ , що відповідає т.е.р.с.  $E_{ie}$ , будують градувальну характеристику термопари. Вихідні дані для побудови такої характеристики беруть із табл.3.1, табл.3.2, табл.3.3. враховуючи тип термопари.

Після цього визначають абсолютну, відносну і приведену похибки за формулами (2.4), (2.5), (2.6) і результати розрахунків заносять в табл.3.4.

Визначають клас точності робочої термопари. Для цього серед знайдених  $\Delta\Theta_1, \Delta\Theta_2, \Delta\Theta_3, \Delta\Theta_4$  (табл.3.2) знаходять  $(\Delta\Theta)_{max}$  і визначають максимальну приведену похибку за формулою

$$\gamma_{max} = \frac{(\Delta\Theta)_{max}}{\Theta_{max}} \cdot 100, (\%). \quad (3.3)$$

Номинальна статична характеристика перетворення ТПП

Таблиця 3.1

Температура робочого кінця $\Theta$ , °C	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Т.е.р.с. $E$ , мВ	0,296	0,647	1,041	1,468	1,923	2,400	2,896	3,407	3,933	4,471

### Номінальна статична характеристика перетворення ТХА

Таблиця 3.2

Температура робочого кінця $\Theta, ^\circ\text{C}$	50	100	150	200	250	300	350	400
Т.е.р.с. $E, \text{мВ}$	2,023	4,096	6,138	8,138	10,153	12,209	14,293	16,397

### Номінальна статична характеристика перетворення ТХК

Таблиця 3.3

Температура робочого кінця $\Theta, ^\circ\text{C}$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Т.е.р.с. $E, \text{мВ}$	0,639	1,290	1,951	2,624	3,306	3,999	4,701	5,413	6,133	6,862
Температура робочого кінця $\Theta, ^\circ\text{C}$	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Т.е.р.с. $E, \text{мВ}$	7,599	8,344	9,096	9,857	10,624	11,398	12,179	12,967	13,761	14,560

Таблиця 3.4.

№ п/п	Покази термопар				Похибки		
	еталонної		робочої		Абсолютна, $\Delta\Theta, ^\circ\text{C}$	Відносна, $\delta, \%$	Приведена, $\gamma, \%$
	$E_{із}, \text{мВ}$	$\Theta_{ід}, ^\circ\text{C}$	$E_{і}, \text{мВ}$	$\Theta_{і}, ^\circ\text{C}$			
1.	$E_{Iз}$	$\Theta_{Iд}$	$E_I$	$\Theta_I$	$\Delta\Theta_I$	$\delta_I$	$\gamma_I$
2.							
3.							
4.							

Маючи  $\gamma_{\max}$ , клас точності вибирають із ряду

$$K_l = (1.0; 1.5; 2.0; 2.5; 4.0; 5.0; 6.0) \cdot 10^n$$

де  $n$  може приймати значення  $1; 0; -1; -2; \dots$

#### 4. Моделювання термопари в системах керування

Термопара разом з корпусом (захисною арматурою) має теплоємність. Тому миттєва зміна температури вимірюваного середовища не спричинятиме миттєвої зміни сигналу термопари. Вихідний сигнал термопари змінюватиметься поступово по мірі того, як все більше теплоти передаватиметься від вимірюваного середовища чутливому елементу до досягнення теплової рівноваги. Динаміка цього процесу може бути описана передаточною функцією (функцією, що описує залежність виходів деякої динамічної лінійної стаціонарної системи від її входів). В першому наближенні термопара буде описуватись аперіодичною передатною функцією першого порядку, що має вигляд  $W(s) = \frac{k}{Ts + 1}$ . Вхідною

величиною є температура вимірюваного середовища, вихідною величиною – т.е.р.с. Коефіцієнт передачі  $k$  характеризує підсилення вхідного сигналу, а стала часу  $T$  – інерційні властивості. При подачі на вхід такої ланки одиничного стрибкоподібного сигналу вихідна величина змінюватиметься так, як показано на рис. 4.1.

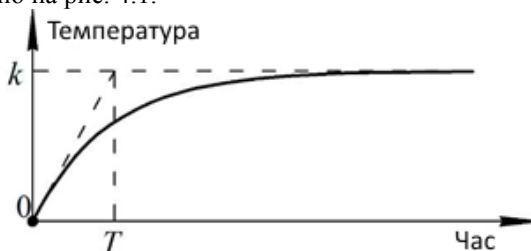


Рис. 4.1. Перехідна характеристика аперіодичної ланки першого порядку

За наявності нелінійностей у статичній характеристиці її лінеаризують, що на графіку буде представлено прямою 1 з кутовим коефіцієнтом

$$k = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (\text{рис. 4.2.}).$$

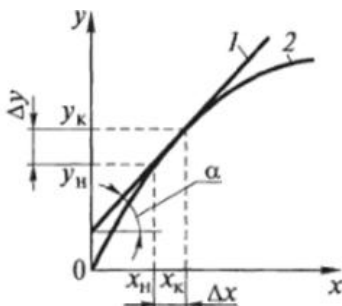


Рис. 4.2. Лінеаризація статичної характеристики в робочому діапазоні

Чим більша теплоємність корпусу та чутливого елемента термопари, тим повільніше змінюватиметься температура чутливого елемента та його вихідний сигнал, а отже тим більше часу після зміни зовнішньої температури потрібно, щоб вихідна напруга термопари досягла нового усталеного рівня. Для моделювання перехідного процесу можна використати додаток Simulink пакету Matlab (рис. 4.3.).

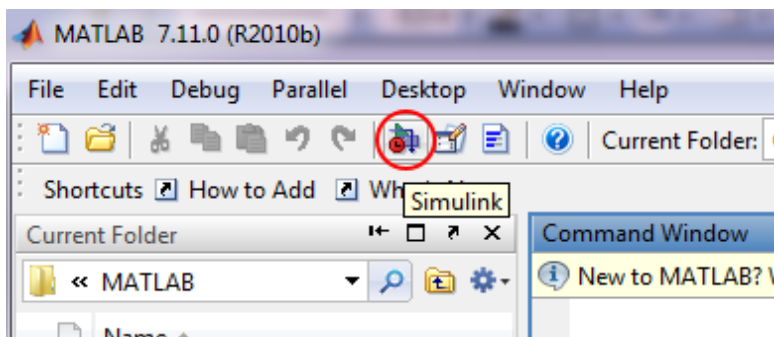


Рис. 4.3. Запуск додатку Simulink

Далі з бібліотеки блоків виберіть Transfer Fcn (підрозділ Continuous), клацніть правою кнопкою миші та оберіть «Add to a new model». З бібліотеки блоків перетягніть у створену модель Step (підрозділ Sources) і Scope (підрозділ Sinks). В блоці Step задати Step time рівним нулю. В блоці Transfer Fcn за коефіцієнт  $k$  у чисельнику передатної функції взяти чутливість перетворювача (див. Розділ 1), а за величину сталої часу – 2 цифри варіанту. Час моделювання (рис. 4.4.) задати не менше  $7T$ , де  $T$  – стала часу.

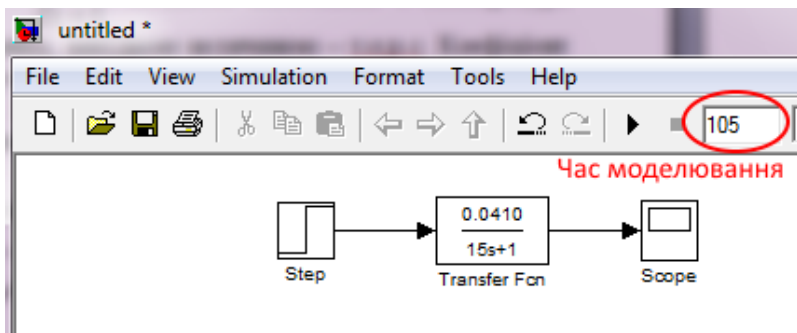


Рис. 4.4. Модель термопари, складена в Simulink

Запустити моделювання та відкрити блок Scope. Промасштабувати отриманий графік по висоті та ширині за допомогою кнопки Autoscale. Зберегти отриману перехідну характеристику.

## 5. Вплив параметрів на вихідний сигнал

### 5.1. Похибка відліку по шкалі

Око спостерігача при відліку температури повинно розміщуватися так, щоб промінь зору був перпендикулярний до площини шкали приладу. В дійсності спостерігач допускається похибок при відліку значення показу.

Загальний вираз для обчислення похибки відліку показів

$$\Delta = \Delta_3 + \Delta_{II} + \Delta_i,$$

де  $\Delta_3$  – похибка із-за обмеженої розрізняючої здатності зору,  $\Delta_{II}$  – похибка від паралаксу (зміни видимого положення предмета при спостереженні його з двох різних точок  $A_1$  і  $A_2$ ),  $\Delta_i$  – похибка інтерполяції (наближене обчислення значень за деякими даними її значень). При цьому  $\Delta_3 = k_3 C$ ;  $\Delta_{II} = k_{II} C$ ;  $\Delta_i = k_i C$ , де  $k_3, k_{II}, i k_i$  знаходять для свого

варіанту згідно табл. 5.1;  $C = \frac{\Theta_{max}}{0,5} \cdot \frac{Kл}{100}$  – ціна поділки мілівольтметра

( $\Theta_{max}$  приймають для свого варіанту згідно табл.1);  $Kл$  – клас точності мілівольтметра вибирають із табл.5.1.

Після обчислення абсолютної похибки відліку показів  $\Delta$ , приступають до обчислення приведеної похибки відліку показів

$$\gamma = \frac{\Delta}{\Theta_{max}} \cdot 100, \% \quad (5.1)$$

Таблиця 5.1

Остання цифра шифру	$k_3$	$k_{II}$	$k_i$	$Kл$	$d, м$	$\delta, м$	$l, м$	$\lambda,$	$\alpha,$
								$\frac{ккал}{м \cdot год \cdot град}$	$\frac{ккал}{м^2 \cdot год \cdot град}$
0	0,040	0,030	0,110	0,5	0,020	0,0025	0,35	24	31
1	0,041	0,031	0,109	1,0	0,019	0,0023	0,32	25	32
2	0,042	0,032	0,108	1,5	0,018	0,0021	0,27	26	33
3	0,043	0,033	0,107	2,5	0,017	0,0019	0,23	27	34
4	0,044	0,034	0,106	0,5	0,016	0,0017	0,19	28	35
5	0,045	0,035	0,105	1,0	0,015	0,0015	0,15	29	36
6	0,046	0,036	0,104	1,5	0,014	0,0013	0,11	30	37
7	0,047	0,037	0,103	2,5	0,013	0,0011	0,14	31	38
8	0,048	0,038	0,102	0,5	0,012	0,0012	0,18	32	39
9	0,049	0,039	0,101	1,0	0,011	0,0014	0,25	33	40



## 5.2. Вплив теплопровідності

Значні похибки виникають в термометрах, які поміщені в металевий чохол чи гільзу, що часто буває у термопар.

Необхідно врахувати виникаючу тут похибку. В більшості випадків термопара (вимірювач температури) знаходиться на границі двох середовищ з різними температурними полями, тому сам термометр і його елементи є каналом теплообміну. Складний динамічний характер теплової взаємодії елементів термопари, гільзи і середовища визначають величину похибки  $\Delta_{C_1}$ , зумовлену впливом теплопровідності. Величина цієї

похибки залежить від таких параметрів:  $t_u$  – істинної температури

середовища;  $t_l = \frac{\Theta_{max}}{2}$  – температури в кінці гільзи (покази термометра);

$t_0 = t_l - 50$  – зовнішньої температури гільзи;  $l$  – довжини гільзи, м;  $\alpha$  – коефіцієнта тепловіддачі від середовища до гільзи,  $\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{град}}$  і

$f = \frac{\pi}{4} (d - 2\delta)^2$  – площі поперечного перерізу гільзи,  $\text{м}^2$ , де  $d$  –

зовнішній діаметр гільзи, м,  $\delta$  – товщини стінки гільзи, м;  $U = \pi d$ ;  $\lambda$  – коефіцієнта теплопровідності матеріалу гільзи,  $\frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{год} \cdot \text{град}}$ . Числові

значення цих параметрів наведені в табл.5.1.

Позначивши  $m = \sqrt{\frac{\alpha U}{\lambda f}}$ , одержимо формулу для визначення істинної температури середовища

$$t_u = \frac{t_l \operatorname{ch}(ml) - t_0}{\operatorname{ch}(ml) - 1}. \quad (5.2)$$

Значення гіперболічного косинуса  $\operatorname{ch}$  дані в табл.5.2.

Гіперболічний косинус для  $x > 3$  обчислюють за формулою

$$\operatorname{ch} x = \frac{e^x + e^{-x}}{2}.$$

Отже, систематична похибка результату вимірювань температури за рахунок впливу теплопровідності

$$\Delta_{C_1} = t_l - t_u. \quad (5.3)$$

Таблиця 5.2

$x$	$ch\ x$	$x$	$ch\ x$	$x$	$ch\ x$
0,0	1,000	1,1	1,668	2,1	4,144
0,1	1,005	1,2	1,811	2,2	4,568
0,2	1,020	1,3	1,971	2,3	5,037
0,3	1,045	1,4	2,151	2,4	5,557
0,4	1,081	1,5	2,352	2,5	6,132
0,5	1,128	1,6	2,577	2,6	6,769
0,6	1,186	1,7	2,828	2,7	7,474
0,7	1,255	1,8	3,108	2,8	8,253
0,8	1,337	1,9	3,418	2,9	9,115
0,9	1,433	2,0	3,762	3,0	10,068
1,0	1,543	2,1	4,144		

### 5.3. Вплив теплового випромінювання

Термопара з чохлом вмонтована в трубопровід. При вимірюваннях в газових середовищах біля термопари з чохлом знаходяться поверхні сталеної труби, температура якої помітно відрізняється від температури самої термопари. В цьому випадку між цими поверхнями і термопарою проходить променевий теплообмін, що описується законом Стефана-Больцмана. Систематична похибка вимірювання від теплового випромінювання

$$A_{C_2} = \frac{C_1}{\alpha} \left[ \left( \frac{T_l}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right]. \quad (5.4)$$

В формулі (5.4) введені такі параметри:  $C_1 = 4,06 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{град}^4}$  константа теплового випромінювання для чохла термопари із окисленої сталі:  $T_1 = t_l + 273,15, ^\circ K$ ;  $T_0 = t_0 + 273,15, ^\circ K$ ;  $t_0 = t_l - 50 = \frac{\Theta_{\max}}{2} - 50$ .

Коефіцієнти  $\alpha$  і  $t_l$  вибирають із табл.5.1. і п.5.2.

### 5.4. Вплив положення

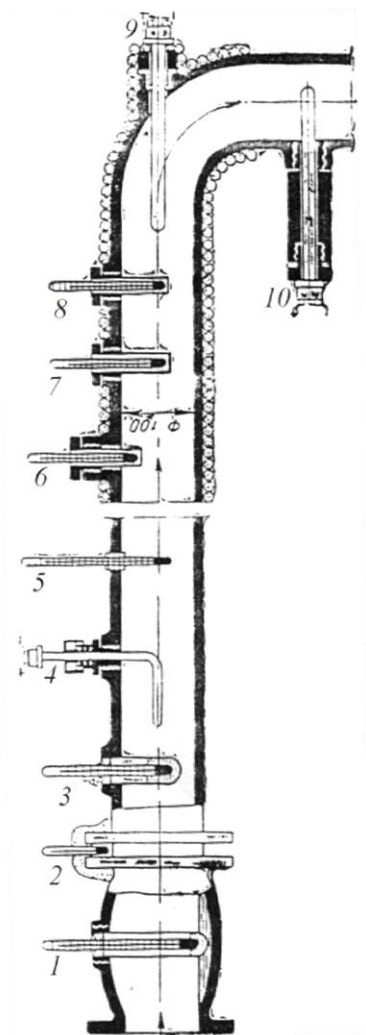
Покази термопар безпосередньо залежать від теплопередачі середовища до термопари. Показані на рис.5.1 різні варіанти розміщення

термопар дозволяють зробити висновки, загальні для всіх вимірювачів температури.

Термопара 1 встановлена неправильно, її покази залежать від температури нерухомої рідини, а не середовища, що рухається в трубопроводі. Термопара 2 у випадку перегрітої пари і гарячих рідин дозволяє наближено вимірювати температуру без занурення в середовище. Цей спосіб є придатним при високих тисках. Термопара 3 встановлена в гільзі, заповнена рідиною, що кипить при вимірюваній температурі, вона дає занижені покази. Встановлення термопари 4 на ущільненні правильне і рекомендоване при високих тисках. Термопара 5 може працювати тільки в середовищі при майже атмосферному тиску. Термопара 6 має розсіювання тепла (масивна гільза), і резервуар його обтікається потоком з меншою швидкістю. Обтікання термопар 7 і 8 не забезпечує доброї теплопередачі внаслідок наявності аеродинамічної “тіні” за гільзами. До того ж термопара 7 має дуже масивну гільзу. Термопара 10 встановлена зовні ізоляції на масивному штуцері, що розсіює багато тепла. Тільки термопара 9 розміщена чутливим кінцем назустріч потоку при достатній глибині занурення. Систематичні похибки  $\Delta_{C_3}$  вимірювання температури термопарами залежно від положення їх в трубопроводі вказані в табл.5.3.

Таблиця 5.3

Остання цифра суми двох останніх цифр шифру	Положення термопари	Похибка $\Delta_{C_3}$ , °C	$v$ , м/с	$r_L$ , Ом	$E(\Theta_3, 0)$ , мВ	$R_m$ , Ом	$R_3$ , Ом	$\Theta_4$ , °C
0	4	- 3	100	1,1	0,1	100	0,6	45
1	5	- 5	140	1,2	0,2	150	1,6	40
2	6	- 15	180	1,3	0,3	200	5	35
3	7	- 2	220	1,4	0,4	250	15	30
4	8	- 1	260	1,5	0,1	300	25	25
5	9	0	300	1,1	0,2	100	1,6	22
6	10	- 45	340	1,2	0,3	150	5	28
7	4	- 3	120	1,3	0,4	200	1,6	32
8	5	- 5	160	1,4	0,1	250	25	38
9	6	- 15	180	1,5	0,2	300	15	42



*Рис.5.1 Варіанти розміщення термопар*

### **5.5.Вплив швидкості потоку**

При зміні температури газу, що рухається з великою швидкістю, виникає методична похибка із-за сповільнення потоку газу термочутливим елементом. При цьому кінетична енергія газу переходить в теплову, і в зоні гарячого спаю термопар температура змінюється на величину

$$A_{C_4} = \frac{v^2}{2C_p}, \quad (5.5)$$

де  $v$  – швидкість потоку газу після сповільнення, м/с, вибирається з табл.5.3;  $C_p$  – теплоємність газу при постійному тиску,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$ , що визначається за формулою

$$C_p = \frac{\chi R}{\chi - 1}, \quad (5.6)$$

$\chi$  – показник адіабати (для повітря  $\chi = 1,4$ );  $R$  – газова стала,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$

(для повітря  $R = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$ ).

### 5.6. Вплив електричної ізоляції електродів

Електропровідність ізоляційних матеріалів робочої частини термопарі різко підвищується при збільшенні температури. Відносну похибку показів термопарі визначають за формулою

$$\delta_{C_5} = \frac{r_1(E_1 - E_2)}{(R_i + r_1)E_1} \cdot 100\%, \quad (5.7)$$

де  $E_1$  – т.е.р.с., що розвивається термопарою при температурі гарячого

спаю  $\Theta_1 = \frac{\Theta_{max}}{2}$  (визначається з експериментальної градууювальної

характеристики робочої термопарі);  $E_2$  – т.е.р.с., що розвивається на

віддалі 7 см від гарячого спаю при температурі  $\Theta_2 = 0,975\Theta_1$ ;  $r_1$  – опір

термопарі між спаєм і точкою на віддалі 7 см від спаю (вибирають для

свого варіанту з табл.5.3);  $R_i$  – опір ізоляції в даній точці, визначається за

формулою  $R_i = R_0 \left( \frac{\Theta_0}{\Theta_1} \right)^5$ , де  $R_0 = 10^6 \text{ Ом}$ ,  $\Theta_0 = 100^\circ \text{C}$ . Абсолютна

систематична похибка визначається за формулою

$$A_{C_5} = \frac{\delta_{C_5}}{100} \Theta \quad (5.8)$$

### 5.7. Вплив температури холодного спаю

Термопари градуують при певній постійній температурі вільних кінців ( $\Theta_2 = 0^\circ C$ ). Якщо ж при технічних вимірюваннях температура холодного спаю не буде відповідати градуувальній,  $\Theta_2 = 0^\circ C$  а буде рівна кімнатній  $\Theta_3$ , то покази приладу будуть неправильні. В такому випадку за допомогою експериментальної градуувальної характеристики робочої термопары визначають поправку на холодний спай, тобто т.е.р.с.  $E(\Theta_3, 0^\circ C)$  при температурах спаїв  $\Theta_3$ ,  $\Theta_2 = 0^\circ C$  і додавають її до виміряної термо е.р.с. Таким чином, дійсна т.е.р.с.

$$E(\Theta, 0^\circ C) = E(\Theta, \Theta_3) + E(\Theta_3, 0^\circ C) \quad (5.9)$$

Отже, підвищення температури холодного спаю термопары зменшує її на величину, рівну термо- е.р.с.  $E(\Theta_3, 0^\circ C)$ , що розвивається даною температурою при температурі спаїв  $\Theta_3$  (кімнатна) і  $\Theta_2$ . Величину  $E(\Theta_3, 0^\circ C)$  вибирають із табл.5.3. По цій величині і робочій характеристиці, побудованій в п.2, визначають температуру  $\Theta_3$ .

Температура  $\Theta_3$  являється поправкою до виміряної температури, а систематична похибка буде рівною

$$\Delta_{C_6} = -\Theta_3 \quad (5.10)$$

### 5.8. Вплив опору зовнішнього кола

В якості засобів вимірювальної техніки, що працюють в комплекті з термопарою, використовуються мілівольтметри магнітоелектричної системи, потенціометри (наприклад, ПП-63) або нормуючі перетворювачі.

В будь-якому такому комплекті виникають додаткові похибки, джерелами яких є: неправильний підбір опору зовнішнього кола, зміна температури середовища, дія зовнішніх магнітних полів.

Як відомо, покази мілівольтметра визначаються струмом, що проходить через його рамку. Величина цього струму визначається за формулою

$$I = \frac{E(\Theta, 0^\circ C)}{R_T + 2R_{II} + R_M}, \quad (5.11)$$

де  $R_T$  – опір термопары;  $R_{II}$  – опір з'єднувальних провідників;  $R_M$  – опір мілівольтметра.

Опір термопары  $R_T$  змінюється в залежності від зношування і нагріву

термопар. Опір з'єднувальних провідників  $R_{\Pi}$  залежить від температури приміщення. Опір  $R_M$  також залежить від температури оточуючого середовища.

Для зменшення впливу зовнішнього опору  $R_3 = R_T + R_{\Pi}$  на результати вимірювання опір мілівольтметра  $R_M$  роблять набагато більшим  $R_3$ . Крім того, опір з'єднувальних провідників підганяють до певного значення при градуюванні шкали мілівольтметра. Тоді похибку вимірювання можна обчислити за формулою

$$\Delta_{C_7} = \frac{R'_T - R_T}{R_3 + R_3} \cdot \Theta \quad (5.12)$$

Похибка від'ємна. В даній формулі  $\Theta = \frac{\Theta_{max}}{2}$  – відлік по мілівольтметру, °C;  $R_T = 1,54 \cdot l$  – опір термопар при +20 °C для електродів діаметром 0,5 мм;  $R'_T = 1,54 \cdot k \cdot l$  – опір термопар при температурі  $\Theta$ ;  $k$  – коефіцієнт, що виписується із табл. 5.4;  $l$  – довжина термопар, м (із табл. 5.1). Значення  $l$ ,  $R_M$ ,  $R_3$  взяти для свого варіанту із табл. 5.1 і табл. 5.3.

Значення коефіцієнту  $k = \frac{R'_T}{R_T}$  для термопар

Таблиця 5.4

Температура °C	k	Температура °C	k	Температура °C	k
0	1.00	500	2,15	1000	3,15
100	1.24	600	2,36	1100	3,33
200	1.48	700	2,57	1200	3,51
300	1.71	800	2,77		
400	1.93	900	2,96		

## 5.9. Вплив опору мілівольтметра

Зміна температури мілівольтметра призводить, в основному, до зміни трьох параметрів приладу: напруженості магнітного поля, пружності протидіючих пружинок і опору рамки. Зміна перших двох величин не впливає на покази приладу, так як температурні коефіцієнти магнітної індукції і модуля пружності майже однакові, мають протилежні знаки і

компенсують один одного. Залишається похибка за рахунок зміни опору рамки, що призводить до появи відносної похибки показів мілівольтметра. В даному випадку знижується загальний температурний коефіцієнт мілівольтметра

$$\alpha_M = \alpha_p \frac{R_p}{R_p + R_D}, \quad (5.13)$$

де  $\alpha_p$  – температурний коефіцієнт опору рамки приладу, рівний для міді і алюмінію  $4,25 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $R_p, R_D$  – опір рамки приладу і додатковий опір, включений послідовно з рамкою, відповідно.

Відносна похибка показів мілівольтметра при відхиленні його температури від градуовальної ( $\Theta_5 = +20^\circ\text{C}$ ) може бути визначена за формулою

$$\delta_{C_8} = \frac{(R_M + R_3) - (R_M^{\Theta_4} + R_3)}{R_M + R_3} \cdot 100, \%, \quad (5.14)$$

де  $R_M$  – опір мілівольтметра в умовах градування, Ом (із табл. 5.3);  $R_3$  – опір зовнішнього кола (із табл. 5.3);  $R_M^{\Theta_4} = R_M [1 + \beta(\Theta_4 - \Theta_5)]$  – опір мілівольтметра в умовах експлуатації, Ом;  $\beta = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  – температурний коефіцієнт опору;  $\Theta_4$  – температура при якій експлуатується прилад (із табл. 5.3).

Абсолютна систематична похибка за рахунок впливу опору мілівольтметра

$$\Delta_{C_8} = \frac{\delta_{C_8}}{100} \cdot \Theta \quad (5.15)$$

## 6. Обробка результатів вимірювань

### 6.1 Послідовність обчислень при обробці результатів вимірювань

В одній із реперних точок (основних точок температурної шкали згідно технологічного процесу) діапазону вимірювань температур  $\Theta = \frac{\Theta_{max}}{2}$  за допомогою ряду окремих спостережень, виконаних з однаковою точністю і в однакових умовах одним і тим же спостерігачем отримують ряд послідовних  $N = 100$  (рівноточних) вимірювань з наступними числовими



даними:  $\Theta_1^*, \Theta_2^*, \dots, \Theta_{11}^*$ , що повторюються  $n_1^*, n_2^*, \dots, n_{11}^*$ . Результати умовно отриманих експериментальних даних записані для кожного варіанту в табл. 6.1 і табл. 6.2.

Нехай дано шифр 29. Згідно табл.1 за останньою цифрою шифру 9 знаходять  $\Theta_{max} = 280^\circ C$ . Тоді  $\Theta = \frac{\Theta_{max}}{2} = 140^\circ C$ . Згідно табл. 6.1 за цифрою 9

$$\Delta\Theta_1^* = 1,6 \frac{\Theta}{50} = 1,6 \frac{140}{50} \approx 4,5^\circ C$$

$$\text{і } \Theta_1^* = \Theta + \Delta\Theta_1^* = 140 + 4,5 = 144,5 (^\circ C).$$

Згідно табл. 6.2 за цифрою 2 знаходять  $n_1 = 1$ . Це означає, що значення температури  $\Theta_1^* = 144,5^\circ C$  при багаторазових вимірюваннях повторилося один раз. Аналогічно необхідно визначити наступні значення  $\Theta_1^*, \Theta_2^*, \dots, \Theta_{11}^*$  і записати їх в зростаючому порядку.

### Відхилення температури

Таблиця 6.1

Остання цифра шифру	$\Delta\Theta_1^*$	$\Delta\Theta_2^*$	$\Delta\Theta_3^*$	$\Delta\Theta_4^*$	$\Delta\Theta_5^*$	$\Delta\Theta_6^*$	$\Delta\Theta_7^*$	$\Delta\Theta_8^*$	$\Delta\Theta_9^*$	$\Delta\Theta_{10}^*$	$\Delta\Theta_{11}^*$
0	2	1,6	1,2	0,8	0,4	0	-0,4	-0,8	-1,2	-1,6	-2,8
1	1,9	1,5	1,1	0,7	0,3	-0,1	-0,5	-0,9	-1,3	-1,7	-2,9
2	1,8	1,4	1,0	0,6	0,2	-0,2	-0,6	-1,0	-1,4	-1,8	-3,2
3	1,7	1,3	0,9	0,5	0,1	-0,3	-0,7	-1,1	-1,5	-1,9	-3,3
4	1,6	1,3	1,0	0,7	0,4	0,1	-0,2	-0,5	-0,8	-1,2	-2,6
5	2	1,7	1,3	0,7	0,3	0	-0,3	-0,7	-1,3	-1,7	-3,0
6	1,9	1,6	1,3	0,7	0,4	0,2	-0,1	-0,3	-0,8	-1,5	-3,0
7	2,1	1,5	1,0	0,6	0,2	0	-0,2	-0,6	-1,0	-1,5	-3,1
8	1,9	1,5	1,2	0,7	0,3	0	-0,3	-0,7	-1,2	-1,5	-3,9
9	1,6	1,2	0,9	0,5	0,1	0	-0,1	-0,5	-0,9	-1,2	-3,6

Числа в табл. 6.1 записані як кратні  $\frac{\Theta}{50}$ .

Таблиця 6.2

Передостан- ня цифра шифру	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$	$n_7$	$n_8$	$n_9$	$n_{10}$	$n_{11}$	$\alpha$	$P$
0	1	2	4	6	21	34	20	7	3	1	1	0,100	0,8
1	1	1	5	8	20	33	19	8	2	2	1	0,075	0,9
2	1	2	6	8	19	32	18	9	3	1	1	0,050	0,95
3	1	3	5	9	18	31	17	9	4	2	1	0,025	0,98
4	2	2	6	10	17	30	16	10	3	3	1	0,100	0,99
5	0	1	3	7	22	35	21	8	1	1	1	0,075	0,8
6	1	1	3	6	21	40	15	7	3	2	1	0,050	0,9
7	1	2	2	7	20	39	16	8	3	1	1	0,025	0,95
8	1	1	2	8	19	38	17	9	2	2	1	0,100	0,98
9	1	2	1	9	18	36	18	10	3	1	1	0,075	0,99

Статистична обробка результатів вимірювань виконується у такій послідовності:

- виключають (або зменшують) систематичні складові похибки із результатів спостережень;

- перевіряють графоаналітичним способом відповідність експериментального закону розділу теоретичному (нормальному). У випадку, якщо ця частина генеральної сукупності розподілена за нормальним законом, обробку продовжують;

- обчислюють найбільш імовірне значення  $\bar{\Theta}$  шуканої величини;

- обчислюють середньоквадратичне відхилення  $S$  результату спостереження;

- при підозрі аномальності деякого результату спостереження  $\Theta_k$ , що значно відрізняється від останніх у варіаційному ряді, обчислюють показник аномальності  $u_k$  для цього результату і співставляють його з табличною величиною  $\beta$  для даного об'єму спостережень. Якщо підозри підтверджуються, цей результат спостереження  $\Theta_k$  повинен бути із ряду виключений, а значення  $\bar{\Theta}$  і  $S$  обчислені заново (для цього ряду, але без  $\Theta_k$ );

- обчислюють коефіцієнт варіації  $v$  для даного ряду;

- обчислюють середньоквадратичне відхилення результату вимірювання  $S_{\bar{\Theta}}$ ;

- обчислюють гарантійні границі  $\varepsilon$  випадкової складової похибки результату вимірювань;
- записують результат вимірювання.

## 6.2 Виключення систематичних складових похибки із результатів вимірювань

Із розділу 5 виписують всі систематичні складові похибки з відповідними знаками:  $\Delta_{C_1}, \Delta_{C_2}, \dots, \Delta_{C_8}$ . Знаходять їх алгебраїчну суму  $\Delta_C$  і визначають поправку за формулою

$$\Delta_{II} = -\Delta_C = -\sum_{i=1}^8 \Delta_{C_i} . \quad (6.1)$$

Поправкою  $\Delta_{II}$  називається значення величини, однорозмірної до вимірної, яке додається до значення, отриманого при вимірюванні, з метою виключення систематичної похибки. Виправлені значення шукають за формулою

$$\Theta_i = \Theta_i^* + \Delta_{II} . \quad (6.2)$$

Після виправлення отримують ряд  $\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_{11}$  з частотами  $n_1, n_2, \dots, n_{11}$ , визначеними з табл. 6.2.

## 6.3 Графоаналітичний спосіб перевірки відповідності дослідного розподілу нормальному

Цей спосіб передбачає використання імовірносної сітки, на якій за певними правилами будують графік емпіричного розподілу (для аналізованої групи спостережень). По конфігурації цього графіку можна визначити, чи дослідний розподіл відповідає нормальному закону. В даному випадку будують прямолінійний графік для нормального закону розподілу.

Для впорядкованого варіаційного ряду  $\Theta_1 < \Theta_2 < \dots < \Theta_j < \dots < \Theta_{11}$  складають табл. 6.3.

Таблиця 6.3

j	$\Theta_j$	$n_j$	$N_j$	$\Phi(y_j)$	$y_j$
1	2	3	4	5	6
...					

В графі 3 записують частоти  $n_j$ , в графі 4 – наростаючою сумою так звані “накопичені частоти”  $N_j$  (сума значень  $n_j$  від початку до даного  $\Theta_j$  включно). Після чого обчислюють значення інтегралу Лапласа

$$\Phi(y_j) = \frac{N_j}{N+1} - 0,5, \quad (6.3)$$

де  $N = 100$ .

Знаючи  $\Phi(y_j)$ , з таблиць можна знайти відповідні значення  $y_j$ . Для цього може бути використана табл. 6.4. В табл. 6.4 функція  $\Phi(y_j)$  складена тільки для додатних значень  $y_j$ , для від’ємних необхідно використовувати співвідношення  $\Phi(-y_j) = -\Phi(y_j)$ . Для кожної пари значень  $\Theta_j$  і  $y_j$  необхідно відмітити точку в прямокутній координатній системі з рівномірною шкалою ( $\Theta_j$  – на вісі абсцис,  $y_j$  – на вісі ординат).

З’єднавши точки, отримують графік функції  $y_j = \varphi(\Theta_j)$ . Якщо цей графік приблизно прямолінійний, то даний варіаційний ряд не протирічить нормальному закону розподілу.

Ряд не протирічить закону розподілу, якщо виконуються умови

$$\frac{\Delta}{|y_{max}|} \cdot 100 < 50\%; \quad (6.4)$$

і

$$\left| \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{y_{max}} \right| \cdot 100 < 15\%, \quad (6.5)$$

де  $\Delta = \{\Delta_1, \Delta_2\}_{max}$ ;  $|y_{max}| = \{|y_a|, |y_b|\}_{max}$ ;  $\Delta_1$  і  $\Delta_2$  визначають з графіка наведеного на рис. 6.1.

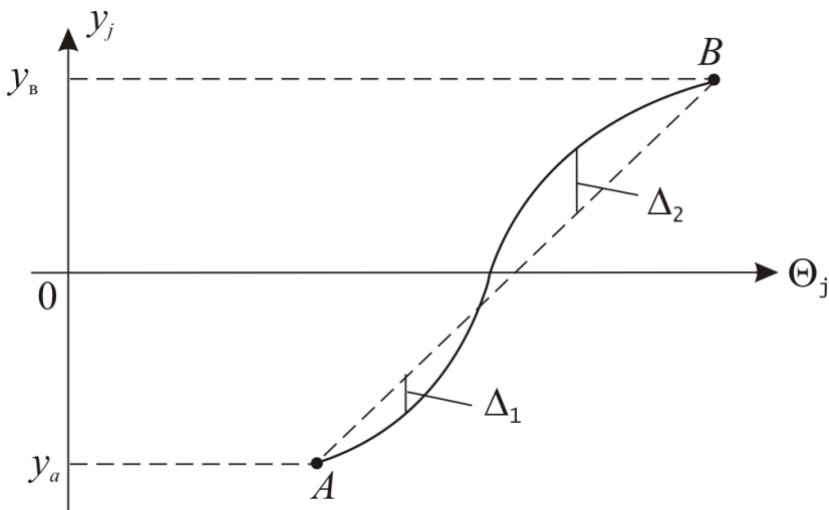


Рис. 6.1. Графік функції  $y_j = \varphi(\Theta_j)$ .

Залежність  $y$  від значення інтегралу Лапласа  $\Phi(y)$

Таблиця 6.4

$\Phi(y)$	$y$	$\Phi(y)$	$y$	$\Phi(y)$	$y$	$\Phi(y)$	$y$
0,01	0,025	0,16	0,41	0,31	0,88	0,460	1,75
0,02	0,050	0,17	0,44	0,32	0,92	0,465	1,81
0,03	0,075	0,18	0,47	0,33	0,95	0,470	1,88
0,04	0,10	0,19	0,50	0,34	0,99	0,475	1,96
0,05	0,13	0,20	0,52	0,35	1,04	0,480	2,05
0,06	0,15	0,21	0,55	0,36	1,08	0,485	2,17
0,07	0,18	0,22	0,58	0,37	1,13	0,490	2,33
0,08	0,20	0,23	0,61	0,38	1,18	0,492	2,41
0,09	0,23	0,24	0,64	0,39	1,23	0,494	2,51
0,10	0,25	0,25	0,67	0,40	1,28	0,495	2,58
0,11	0,28	0,26	0,71	0,41	1,34	0,496	2,65
0,12	0,31	0,27	0,74	0,42	1,41	0,497	2,75
0,13	0,33	0,28	0,77	0,43	1,48	0,498	2,88
0,14	0,36	0,29	0,81	0,44	1,55	0,499	3,10
0,15	0,39	0,30	0,84	0,45	1,64	0,4999	4,00

#### 6.4 Обчислення найбільш імовірного значення результату вимірювань

Найбільш імовірним значенням шуканого результату є середнє арифметичне варіаційного ряду

$$\bar{\Theta} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{11} \Theta_i n_i, \quad (6.6)$$

де  $N = 100$ ,  $i = 1, 2, \dots, 11$ ,  $n_i$  – частота результату спостережень  $\Theta_i$ .

#### 6.5 Обчислення середньоквадратичного відхилення (СКВ) результату спостережень

Статистичне СКВ результату спостережень при  $N > 20$  обчислюють за формулою

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{11} (\Theta_i - \bar{\Theta})^2 n_i}{N}}. \quad (6.7)$$

#### 6.6 Оцінка аномальності окремих результатів спостережень

Якщо розглянутий ряд в цілому належить до нормального розподілу, але виникає підозра в аномальності деякого окремого спостереження  $\Theta_k$ , результат якого різко відрізняється від останніх, необхідно використовувати критерій аномальності результатів спостережень.

Для цього обчислюють показник аномальності

$$u_k = \left| \frac{\Theta_k - \bar{\Theta}}{S} \right|. \quad (6.8)$$

Потім, задавшись рівнем значності  $\alpha = 1 - P$  для даного варіаційного ряду  $N' = 11$ , із табл. 6.5 знаходять параметр  $\beta$ . Для свого варіанту рівень значності  $\alpha$  вибрати із табл. 6.2 за останньою цифрою шифру. Якщо результат  $\Theta_k$  належить до даної сукупності результатів, то з імовірністю  $P = 1 - \alpha$  можна стверджувати, що абсолютне значення показника аномальності  $u_k$  не перевищує  $\beta$ . Отже, критерієм аномальності є умова  $u_k \geq \beta$ . Якщо ця умова виконується, імовірність даного результату спостереження  $\Theta_k$  менше  $\alpha$ . Отже, він аномальний і повинен бути виключений із даного ряду.

Граничні значення  $\beta$  для випадку невідомого генерального середнього квадратичного відхилення  $\sigma$  наведені в табл. 6.5

Таблиця 6.5

$n$	$\alpha$			
	0,100	0,075	0,050	0,025
3	1,15	1,15	1,15	1,15
4	1,42	1,44	1,46	1,48
5	1,60	1,64	1,67	1,72
7	1,83	1,88	1,94	2,02
8	1,91	1,96	2,03	2,13
9	1,98	2,04	2,11	2,21
10	2,03	2,10	2,18	2,29
11	2,09	2,14	2,23	2,36
12	2,13	2,20	2,29	2,41
13	2,17	2,24	2,33	2,47
14	2,21	2,28	2,37	2,50
15	2,25	2,32	2,41	2,55
16	2,28	2,35	2,44	2,58
17	2,31	2,38	2,48	2,62
18	2,34	2,41	2,50	2,66
19	2,36	2,46	2,56	2,71

## 6.7 Визначення коефіцієнта варіації

Після того як із варіаційного ряду спостережень будуть вилучені анормальні результати, повторно обчислюють за формулами (6.6) і (6.7)  $\bar{\Theta}$  і  $S$ , маючи на увазі, що  $N=100-N''$  і змінилися  $n_i$ , де  $N''$  – кількість анормальних результатів.

Визначають коефіцієнт варіації, що являє собою відносну величину статистичного СКВ результату спостережень, %

$$v = 100 \frac{S}{\bar{\Theta}}. \quad (6.9)$$

## 6.8 Обчислення середньоквадратичного відхилення (СКВ) результату вимірювань

Статистичне СКВ результату вимірювань згідно (ДСТУ ISO 2602:2006) оцінюється за формулою

$$S_{\bar{\theta}} = \frac{S}{\sqrt{N}}. \quad (6.10)$$

У формулі (6.10) величина  $S_{\bar{\theta}}$  характеризує точність  $\bar{\theta}$  як оцінки математичного очікування випадкової величини  $\theta$ .

## 6.9. Обчислення гарантійної границі $\varepsilon$ випадкової складової похибки результату вимірювань

Гарантійна границя (інтервал) випадкової складової похибки результату вимірювань в більшості випадків розміщена симетрично відносно величини  $\bar{\theta}$ . Значення гарантійної границі  $\varepsilon$  обчислюють за формулою

$$\varepsilon = t_p \cdot S_{\bar{\theta}}, \quad (6.11)$$

де  $t_p$  – коефіцієнт довіри, що залежить від прийнятої імовірності  $P$  (для свого варіанту  $P$  вибрати із табл. 6.2) і числа ступенів вільності яке рівне  $k = N' - 1 = 11 - 1 = 10$ . Значення  $t_p$  приведені в табл. 6.6.

Значення коефіцієнта Стюдента

Таблиця 6.6

Число ступенів вільності $k=n-1$	Значення $t_p$ при $P_a$ , що рівне								
	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99	0,999
1	0,33	0,73	1,38	3,1	6,3	12,7	31,8	63,7	636,6
2	0,29	0,62	1,06	1,9	2,9	4,3	7,0	9,9	31,6
3	0,28	0,58	0,98	1,6	2,4	3,2	4,5	5,8	12,9
4	0,27	0,57	0,94	1,5	2,1	2,8	3,7	4,6	8,6
5	0,27	0,56	0,92	1,5	2,0	2,6	3,4	4,0	6,9
6	0,27	0,55	0,90	1,4	1,9	2,4	3,1	3,7	6,0
7	0,26	0,55	0,90	1,4	1,9	2,4	3,0	3,5	5,4
8	0,26	0,54	0,90	1,4	1,9	2,3	2,9	3,4	5,0
9	0,26	0,54	0,88	1,4	1,8	2,3	2,8	3,3	4,8



10	0,26	0,54	0,88	1,4	1,8	2,2	2,8	3,2	4,6
11	0,26	0,54	0,87	1,4	1,8	2,2	2,7	3,1	4,5
12	0,26	0,54	0,87	1,4	1,8	2,2	2,7	3,1	4,3
13	0,26	0,54	0,87	1,4	1,8	2,2	2,7	3,0	4,2
14	0,26	0,54	0,87	1,3	1,8	2,1	2,6	3,0	4,1
15	0,26	0,54	0,87	1,3	1,8	2,1	2,6	2,9	4,0
16	0,26	0,54	0,86	1,3	1,7	2,1	2,6	2,9	4,0
17	0,26	0,53	0,86	1,3	1,7	2,1	2,6	2,9	4,0
18	0,26	0,53	0,86	1,3	1,7	2,1	2,6	2,9	3,9
19	0,26	0,53	0,86	1,3	1,7	2,1	2,5	2,9	3,9
20	0,26	0,53	0,86	1,3	1,7	2,1	2,5	2,8	3,8
21	0,26	0,53	0,86	1,3	1,7	2,1	2,5	2,8	3,8
22	0,26	0,53	0,86	1,3	1,7	2,1	2,5	2,8	3,8
23	0,26	0,53	0,86	1,3	1,7	2,1	2,5	2,8	3,8
24	0,26	0,53	0,86	1,3	1,7	2,1	2,5	2,8	3,7
25	0,26	0,53	0,86	1,3	1,7	2,1	2,5	2,8	3,7
26	0,26	0,53	0,86	1,3	1,7	2,1	2,5	2,8	3,7
27	0,26	0,53	0,86	1,3	1,7	2,0	2,5	2,8	3,7
28	0,26	0,53	0,86	1,3	1,7	2,0	2,5	2,8	3,7
29	0,26	0,53	0,85	1,3	1,7	2,0	2,5	2,8	3,7
30	0,26	0,53	0,85	1,3	1,7	2,0	2,4	2,7	3,6
59	0,25	0,53	0,85	1,3	1,7	2,0	2,4	2,7	3,5
...	0,25	0,53	0,85	1,3	1,7	2,0	2,4	2,7	3,4
119	0,25	0,53	0,85	1,3	1,7	2,0	2,4	2,7	3,4
...	0,25	0,52	0,84	1,3	1,6	2,0	2,3	2,7	3,3
$\infty$	0,25	0,52	0,84	1,3	1,6	2,0	2,3	2,7	3,3

## 6.10. Запис результату вимірювань

Результат вимірювань записують у вигляді

$$\Theta = \overline{\Theta} \pm \varepsilon, \quad P = \quad, \quad (6.12)$$

де  $P$  – гарантійна імовірність (для свого варіанту із табл.6.2).

## Література

1. Головка Д. Б., Рего К. Г., Скрипник Ю. О. Основи метрології та вимірювань. К. : Либідь, 2001. 248 с.
2. Метрологія та вимірювальна техніка / Є. С. Поліщук та ін. ; за ред. Є. Поліщука. Львів : Бескид БІТ, 2003. 544с.
3. Древецький В. В. Стець С. В. Спеціальні вимірювання і прилади : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2012. 288 с.
4. Кованько В. В., Древецький В. В., Христюк А. О. Загальнотехнічні вимірювання і прилади : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2013. 189 с.
5. Основи метрології та електричних вимірювань : підручник / В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський, В. В. Грабко. Вінниця : ВНТУ, 2012. 522 с.
6. Марчук В. І., Караченцев В. Є. Основи метрології та електричні вимірювання: теорія і практикум : навчальний посібник. Луцьк : Луцький національний технічний університет, 2013. 621 с.
7. Метрологія та вимірювальна техніка : навчальний посібник. / В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, В. П. Долгополов, Л. В. Грумінська. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. 190 с.
8. Рішан О. Й. Метрологія, технологічні вимірювання та прилади / Курс лекцій для студентів спеціальностей: "Автоматизоване управління технологічними процесами" та "Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва" ден. та заочн. форм навчання. К. : НУХТ, 2007. 162 с.
9. Володарський Є. Т., Кухарчук В. В., Поджаренко В. О., Сердюк Г. Б. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю. Навчальний посібник. Вінниця: Велес, 2001. 219 с.
10. Метрологія. Одиниці фізичних величин. Похідні одиниці фізичних величин Міжнародної Системи Одиниць. Основні положення, назви та позначення: ДСТУ 3651.1.-97. К. : Держстандарт України, 1998.
11. Метрологія. Терміни та визначення: ДСТУ 2681-94. К. : Держстандарт України, 1994. 50 с.
12. Метрологічне забезпечення. Основні положення: ДСТУ 2682-94. К. : Держстандарт України, 1998.
13. Метрологічна атестація засобів вимірювальної техніки. Організація та порядок проведення: ДСТУ 3215-95. К. : Держстандарт України, 1998.
14. Системи керування вимірюванням. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання (ISO 10012:2003, IDT). ДСТУ ISO 10012:2005. К. : Держстандарт України, 2007.
15. Калібрування засобів вимірювальної техніки. Основні положення, організація, порядок проведення та оформлення результатів. ДСТУ 3989-2000. К. : Держстандарт України, 2000.
16. Метрологія. Канали вимірювальні вимірювальних інформаційних

систем та автоматизованих систем керування технологічними процесами. Вимоги до структури та змісту методик виконання вимірювань. ДСТУ 4134-2002. К. : Держстандарт України, 2002.

17. ДСТУ ISO 5479:2009. Статистичне опрацювання даних. Критерії відхилення від нормального розподілу (ISO 5479:1997, IDT).

18. СТ СЭВ 545-77 Прикладная статистика. Правила оценки аномальности результатов наблюдений.

19. ДСТУ ISO 2602:2006. Подавання результатів випробування статистичне. Оцінювання середнього значення. Довірчий інтервал (ISO 2602:1980, IDT)

20. ДСТУ ГОСТ ИСО 5725-1:2005 Точність (правильність і прецизійність) методів та результатів вимірювання. Частина 1. Основні положення та визначення (ГОСТ ИСО 5725-1-2003, IDT).

21. ДСТУ ГОСТ ИСО 5725-6:2005 Точність (правильність і прецизійність) методів та результатів вимірювання. Частина 6. Використання значення точності на практиці (ГОСТ ИСО 5725-6-2003, IDT).